

A bükki barna erdőtalajok klímaérzékenységének vizsgálata matematikai modell alkalmazásával

Tóth Eszter, Gelybó Györgyi, Bakacsi Zsófia, Molnár Sándor, Farkas Csilla
MTA ATK TAKI Talajtani Osztály Budapest
MTA ATK TAKI Környezetinformatikai Osztály Budapest

Összefoglalás

Munkánk során a klímaváltozás erdei talajokra gyakorolt hatását vizsgáltuk és értékeltük matematikai modellen (SWAP) alapuló szcenárió analízissel. A modellezéshez szükséges meteorológiai adatokat az ENSEMBLES projekt eredményein alapuló korrigált klimatológiai adatbázisból, a FORESEE-ből, a talajtani adatokat a TIM adatbázisból nyertük ki. A talajvízforgalom éven belüli változékonyságának vizsgálatát a teljes adatsorból kiválasztott összesen 18 mintaéven végeztük el. Eredményeink alapján az évi középhőmérséklet fokozatos emelkedésére számíthatunk, a csapadékösszeg azonban a jelenlegi klímára jellemző átlagos évi csapadékösszeghez képest a közeljövőben (A1B₅₅) csökkenést, a távoli jövőben (A1B₁₀₀) növekedést mutat. A jövőben megnövekszik az extrém nagy csapadékú (20 mm napi csapadékösszeget meghaladó) napok száma, míg a csapadékos napok száma enyhe csökkenő trendet mutat. Megállapítottuk, hogy a közeli és a távoli jövőben a párolgás és a transzspiráció növekedésével számolhatunk a száraz és csapadékos években egyaránt.

Abstract

In this study the effects of climate change on forest soils has been evaluated with scenario analyses based on mathematical modelling. Meteorological data were originated from the FORSEE database, which provides bias-corrected climate data based on the ENSEMBLES EU project, soil properties data were obtained from the TIM database. The intraannual variability of soil water regime was examined on 18 representative years sampled from the whole period. We concluded that the main annual temperature will gradually increase, although the amount of precipitation will decrease in the near future (A1B₅₅) and increase in the far future (A1B₁₀₀). The number of days with extreme high precipitation (more than 20 mm per day) will increase, while the number of rainy days will be decreased. Evaporation and transpiration will increase in the near and the far future in both wet and dry years.

1. Bevezetés

Napjainkban a klímakutatások egyre inkább megerősítik a globális klímaváltozás tényét. A felmelegedő felszín intenzívebb párolgása miatt a légkör vízgőztartalma megnövekszik, így alkalmanként – egységnyi idő alatt – több csapadék hullik. A klímamodell szimulációk ennek megfelelően a csapadék intenzitásának növekedését valószínűsítik (MEEHL et al., 2000).

Az időjárásban bekövetkező változások a hidrológiai ciklusra is hatással vannak, ennek megfelelően a csapadékösszeg, a párolgás illetve a felszíni lefolyás mértéke, valamint az árvizek és aszályok előfordulásának esélye és gyakorisága is változhat (WATSON et al, 1995). A várhatóan magasabb hőmérséklet és a felszínre érkező csapadék mennyiségének, intenzitásának, eloszlásának változása jelentősen befolyásolhatja a talaj hő-, víz- és tápanyagforgalmát, tehát termékenységét is (VÁRALLYAY, 1992; NÉMETH, 1996; KOVÁCS & DUNKEL, 1997). A szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése következtében a talajok ár- és belvíz, valamint aszályérzékenysége is megnőhet.

A talajok nedvességtartalmának alakulása egyike a legkevésbé ismert változóknak a klíma szimulációk során. A talaj nedvességtartalmát ugyanis nagy térbeli változékonyság jellemzi a talaj típusának és a csapadék mennyiségének függvényében. Ez megnehezíti a numerikus modellek paraméterezését (ENTIN et al., 2000).

A klímamodellek által előrejelzett klímaszcenáriók talajvízforgalomra és növényállományok vízmérlegére gyakorolt hatásainak vizsgálata napjaink egyik fontos kutatási iránya (BIRKÁS & GYURICZA, 2004; TUBA et al., 2004). A fizikai összefüggésekre épülő matematikai modellek lehetővé teszik az összetett folyamatok tanulmányozását, így a klímaváltozásnak a talaj víz-, és hőforgalmára gyakorolt hatásának vizsgálatát is (FARKAS & RAJKAI, 2002; KONCSOS et al., 2004).

Intézetünkben 2011 decemberében indult a Carpath CC (Climate Change) elnevezésű projekt, amit az Európai Bizottság Környezetvédelmi Főigazgatósága finanszíroz. A kutatás célja a térséget fokozottan érintő klímaváltozásnak a vízbázisokra, az ökoszisztémákra és az ökoszisztémán alapuló termelő rendszerekre való hatásainak felmérése, a fókuszba helyezett kisebb területek sérülékenységének vizsgálata, továbbá az érintettek hatékony információcseréjének támogatása és konkrét akciótervek, adaptációs intézkedések megfogalmazása. Az MTA ATK TAKI-ban folyó kutatások a klímaváltozás hatására a talajnedvesség-forgalomban és a talajvízmérleg elemeiben bekövetkező változások becslésére irányulnak bükki erdő és gyepek ökoszisztémákban. Célunk egy olyan módszertan kidolgozása, mely során szcenárió analízis alkalmazásával vizsgáljuk a klímaváltozás hatásait a fent említett aspektusok szerint. A munka során a talaj-növény-légkör rendszer hő- és vízforgalmát leíró matematikai modellel szimuláljuk eltérő prognosztizált klímaváltozási szcenáriók hatását a talaj vízforgalmára és a talajvízmérleg meghatározó elemeire.

2. Vizsgálati anyag és módszer

Vizsgálatainkat a CarpathCC projekt szűkebb hazai mintaterületére, a Bükk hegységre végezzük. A projekt keretében a klímaváltozás erdőkre gyakorolt hatásának értékelésén túl kiemelten foglalkozunk a Bükk-hegység – főként emberi tevékenység nyomán itt kialakult, de ma már önálló természeti értéket képviselő – rétteivel. A matematikai modellen alapuló szcenárió analízis módszertanának kidolgozásához és teszteléséhez egy, a térségre jellemző agyagbemosódásos barna erdőtalajon található gyept választottunk, mert gyepe már rendelkezünk modellillesztési és modellfuttatási tapasztalatokkal.

2.1. A SWAP modell alkalmazása a szcenárió analízisben

A SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) modell (VAN DAM, 2000) a telítetlen zónában történő vízmozgást szimulálja a növényi növekedéssel összefüggésben egy vagy több, egymást követő vegetációs időszakra. A modell alapvetően fizikai összefüggésekre épít. A bemenő adatai között szerepelnek meteorológiai, növényi és talajadatok, továbbá kezdeti és határfeltételek. Vizsgálatainkhoz a SWAP 2.2 modellverziót használtuk. A talajban végbemenő vízmozgást meghatározó talajhidrológiai függvényeket a Van Genuchten & Mualem analitikus összefüggések paramétereivel adják meg a modellben (VAN GENUCHTEN, 1980). A növényi paramétereket a SWAP modell szurdokpüspöki gyepe (HAGYÓ, 2009) optimalizált paraméterfájljaiból vettük át. Mivel talajvízhatással nem kellett számolnunk, alsó peremfeltételként szabad mélybeszivárgást definiáltunk. A SWAP modell futtatásához szükséges és a jövőbeli klímát reprezentáló meteorológiai adatokat az ENSEMBLES projekt eredményein alapuló korrigált klimatológiai adatbázisból, a FORESEE-ből (DOBOR ET AL., 2012) nyertük ki.

2.2. A SWAP modell talajtani bemenő paramétereinek előállítása

A modellezés alapjául a Talajvédelmi Információs és Monitoring rendszer (TIM) E7705 jelű szelvényére vonatkozó adatai szolgáltak (JUHÁSZ, 2006). A szelvény a Bükk központi részétől ÉK-re helyezkedik el, 150 cm mély, genetikai talajtípusa a környékre is általánosan jellemző agyagbemosódásos barna erdőtalaj. A leírás alapján a 0-30 cm közötti, erősen savanyú (vizes pH= 4,1) A-szint egy szerves anyagban gazdag legfelső szintre (0-4 cm, szervesanyag: 7,52%) és egy alatta fekvő, 1,63% szervesanyag tartalmú szintre bontható. Az A-szint fizikai talajfélesége az Arany-féle kötöttség (40-41) alapján még a vályog kategóriába sorolható, de agyagtartalma 30-35% közötti, s ezzel az USDA-szerinti textúra háromszögben az agyagos vályog osztályba tartozik. A szelvényben agyag-felhalmozódás tapasztalható 30-80 cm között (B-szint), az agyagtartalom nem haladja meg a 42%-ot. A B-szint kötöttségi száma alapján agyagos vályog fizikai féleségű, a textúra háromszögben az agyag textúra osztályba sorolható, kémhatása savanyú (vizes pH= 5,3). 80 cm alatt a szelvény aljáig a mechanikai összetétel a feltalajéhoz hasonló, kémhatása gyengén savanyú-semleges.

A talajhidrológiai függvények Van-Genuchten-Mualem paramétereit a TIM adatbázisból kinyert talajfizikai jellemzők és mért víztartó-képesség értékek alapján a RETC (VAN GENUCHTEN et al., 1991) programmal számítottuk. A talaj hidrofizikai adataira illesztett talajhidrológiai függvények paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A modellezéshez felhasznált Van Genuchten-Mualem paraméterek

Talajréteg	WRC	WRS	alpha	n	Ks
cm/szint	m ³ /m ³	m ³ /m ³	cm ⁻¹	(-)	cm/nap
0-5/A	0.45	0.01	0.02	1.16	9.32
5-30/B	0.45	0.01	0.04	1.17	66.52
30-80/C	0.54	0.01	0.03	1.20	86.21
80-130/D	0.49	0.01	0.02	1.19	79.7
130-150/E	0.51	0.01	0.01	1.22	80.34

WRC – telítettségi víztartalom; WRS – reziduális víztartalom; Ks – telítettségi vízvezető-képesség; alpha és n – illesztési paraméterek

2.3. Klímatológiai adatok

A tanulmányban alkalmazott klímatológiai adatokat az ENSEMBLE projekt adatain alapuló FORESEE adatbázis 1/6 × 1/6 fokos felbontású korrigált csapadék és hőmérsékleti adatai szolgáltatták (DOBOR et al., 2012). Az adatbázis folytonos adatsort biztosít 1951 és 2100 között, egyetlen, az elmúlt időszakra vonatkozó, méréseken alapuló adatsorral (referencia, 1951-2009) és nyolc különböző regionális klímamodell eredményein alapuló, A1B szcenárióra vonatkozó klímaprojekcióval (2010-2100) jellemezve a klímát. Az elérhető nyolc, jövőre vonatkozó modellfuttatás közül a RegCM (International Centre for Theoretical Physics) regionális klímamodell eredményeit használtuk.

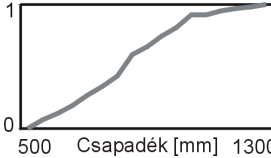
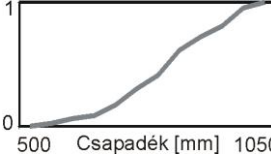
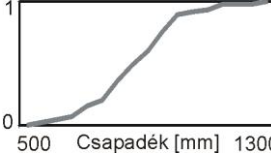
A RegCM modell eredményei viszonylag kis mértékű eltérést mutatnak a jelenlegi és a jövőbeli klíma között. Mivel több olyan modell is van a nyolc között (pl. DMI-HIRHAM5, MPI-M-REMO), melyek csak mérsékelt változást jeleznek előre a csapadékmennyiség és a hőmérséklet alakulásában a Kárpátok térségére, szükségessé vált annak elemzése, hogy ezen szcenáriók megvalósulása esetén várhatóan mennyiben változik meg a vizsgált talajféleségek hő- és vízforgalma a maihoz képest.

Tanulmányunkban a FORESEE adatbázis közép-európai kivágatából a vizsgált talajtípust reprezentáló talajszelvényhez legközelebb eső rácspont napi szintű

meteorológiai adatsorát vettük alapul. Az adott rácspontra érvényes, a klímát jellemző legfontosabb adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

A napi csapadékösszeg, napi minimum és maximum hőmérséklet adatokból az MT-CLIM (Numerical Terradynamic Simulation Group, University of Montana THORNTON et al., 1999) hegyi mikroklímát szimuláló modell segítségével származtattuk a talajvízforgalmi modell számára szükséges egyéb bemenő paramétereket (globálsugárzás, párányomás).

2. táblázat A mintaterület klimatológiai jellemzői a három vizsgált időszakban.

		Hőmérséklet [°C]	Csapadék [mm]	Csapadék sfv
REF	min	11.0	500	
	átlag	12.8	827	
	max	14.2	1278	
A1B₅₅	min	11.7	522	
	átlag	14.0	820	
	max	16.2	1043	
A1B₁₀₀	min	13.6	549	
	átlag	15.7	857	
	max	17.8	1268	

A jelenlegi, és a közel- illetve távoljövőt várhatóan jellemző klíma esetén a talajvízforgalom éven belüli változékonyságának vizsgálatát a teljes adatsorból kiválasztott összesen 18 mintaéven végeztük el. A mintaévek kiválasztásának fő szempontja az volt, hogy azok minél jobban reprezentálják az éves csapadékösszegek és a csapadék éven belül eloszlásának változatosságát. A mintaévek kiválasztása során a referencia időszak (REF) mellett a jövőre vonatkozó 2010-2100 időszakot két rövidebb időszakkal reprezentáltuk. A 91 éves időszakot két, megközelítőleg egyenlő számú évből álló részre osztottuk, a közeli jövő (A1B₅₅; 2010-2055) és a távoli jövő (A1B₁₀₀; 2056-2100) jellemzésére. Ily módon a három időszakot (REF, A1B₅₅, A1B₁₀₀) hasonló számú év reprezentálja, és a közeli és távoli jövőre várható klímaváltozás eltérő intenzitása illetve mértéke is különválasztható.

Az egyes évek csapadékviszonyainak jellemzésére a következő paramétereket alkalmaztuk: éves csapadékösszeg (RT, mm), csapadékos napok száma (RR1, $R \geq 1$ mm), SDII (*Simple Daily Intensity Index*, az éves csapadékösszeg, valamint csapadékos napok számának hányadosa, mm/nap).

Az évek kiválasztása a három paraméter együttes figyelembe vételével történt. Adott időszakban (REF, A1B₅₅, A1B₁₀₀) az éves csapadékösszegek valószínűségi sűrűségfüggvényét az 2. táblázat tartalmazza. Első lépésben kiválogattuk a függvényhez tartozó alsó és felső kvartilis (rendre az átlagosnál szárazabb illetve nedvesebb évek reprezentációja) valamint medián (átlagos csapadékú évek reprezentációja) csapadékösszeg értékekhez legközelebb eső ($\pm 2\%$ megengedett maximális eltérés mellett) éves csapadékösszeggel rendelkező éveket mindhárom időszakra. Ezután adott időszakhoz és adott kvartilishoz tartozó évek SDII értékeit alapul véve kiválasztottuk a csapadékeloszlás szempontjából leegyenletesebb (legkisebb SDII értékkel jellemzett) és leegyenetlenebb (legnagyobb SDII értékkel jellemzett) éveket. A kiválasztott évek adatait a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat Az egyes klímaidőszakokat reprezentáló évek jellemzői és a számított vízmérleg elemek mm-ben (EV- párolgás; TR- transzspiráció; DP- mélybeszivárgás)

		Ref		A1B50		A1B100	
		minSDII	maxSDII	minSDII	maxSDII	minSDII	maxSDII
0.25 (száraz)	RT	687	674	726	714	760	765
	RR1	112	99	121	92	110	92
	SDII	6.1	6.8	6.0	7.76	6.9	8.3
	EV	165	173	202	172	207	192
	TR	417	475	499	410	551	481
	DP	11	1	147	2	242	2
0.5 (átlag)	RT	811	831	837	841	856	854
	RR1	149	103	116	105	119	96
	SDII	5.4	8.1	7.2	8.01	7.2	8.9
	EV	195	174	189	212	220	198
	TR	479	506	517	599	554	593
	DP	3	143	4	4	12	96
0.75 (nedves)	RT	939	955	917	908	941	943
	RR1	129	108	135	123	122	112
	SDII	7.3	8.8	6.8	7.4	7.7	8.4
	EV	220	205	209	217	197	217
	TR	570	574	571	681	625	633
	DP	79	18	191	127	5	416

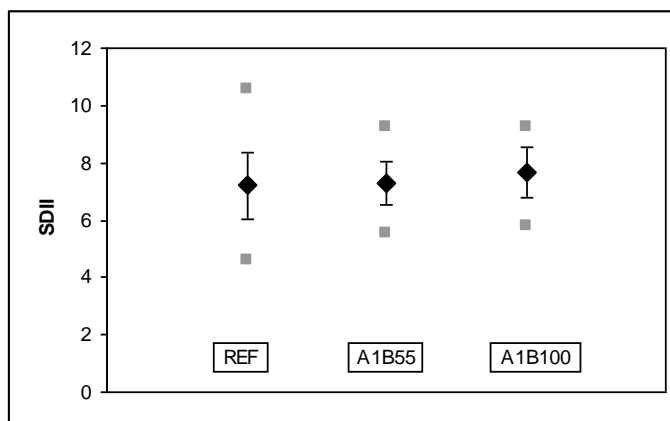
A modellfuttatások eredményeinek felhasználásával értékeltük a talajvízmérleg elemeinek változását (párolgás, növényi vízfogyasztás, mélybeszivárgás, talajvízkészlet-változás) a közeljövőre és a távoli jövőre jellemző klimatikus

viszonyok között a jelenlegi klímára jellemző talajvízmérleg-elemek tükrében. Vizsgálataink során a legegyszerűsebb és a legszélsőségesebb csapadékeloszlású évekre jellemző változásokat is összehasonlítottuk. A talajnedvesség-forgalmat a a gyepterületre jellemző gyökérmélységet figyelembe véve a talaj felső 30-es rétegére elemeztük. Kiszámítottuk azoknak a napoknak a számát, amikor a talaj nedvességtartalma hervadáspont alatt ($pF = 4.2$; D_{hp}), illetve az optimális tartományban volt (pF 2-3,5 között; D_{opt}).

3. Vizsgálati eredmények

3.1. Klimatológiai jellemzők

A klímamodell-eredmények alapján az évi középhőmérséklet fokozatos emelkedésére számíthatunk a három vizsgált időszakon át, azonban az éves csapadékösszeg változása nem mutat ehhez hasonló egyértelmű trendet (2. táblázat). A vizsgált regionális klímamodell szerint az A1B₅₅ időszakban a jelenlegi klímára jellemző átlagos évi csapadékösszeghez képest csökkenés várható. Ezzel szemben a távoli jövőt jellemző A1B₁₀₀ időszakban a csapadék növekedésével számolhatunk. A három időszakban az éves csapadékösszegek eloszlása különböző, az A1B₅₅ időszakban kapott csapadékcsökkenés itt is látható (2. táblázat).



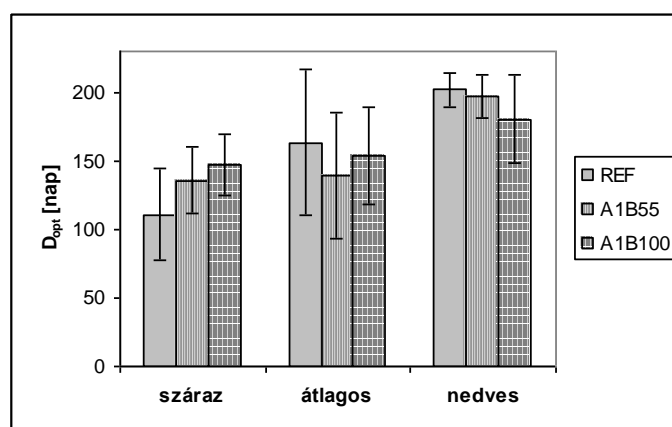
1. ábra. Az átlagos SDII változás a három vizsgált időszak során (fekete gyémánt). Az SDII szórás-értékei szintén leolvashatók az ábráról. Szürke négyzetek jelzik az adott időszakban előforduló minimális és maximális SDII értékeket.

A modell szerint az A1B₅₅ és A1B₁₀₀ időszakokra megnövekszik az extrém nagy csapadékú (20 mm napi csapadékösszeget meghaladó) napok száma, míg a csapadékos napok száma enyhe csökkenő trendet mutat. A napi csapadékontenzitást jellemző SDII index a három időszak során kis mértékben nő (a három időszak éveinek átlagát tekintve), azonban a jövőben az évek közötti különbségek csökkennek (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy egy adott

csapadékmennyiség általában rövidebb idő (kevesebb nap) alatt hullik le. A csapadék éven belüli dinamikájának ilyen jellegű változása a talajnedvesség-forgalomra is hatással lehet.

3.2. Talajnedvesség forgalom és talajvízmérleg elemek

A talajnedvesség-forgalomban bekövetkező változásokat elsősorban a csapadék mennyiségében és dinamikájában bekövetkező változások határozzák meg. A SWAP modellben közvetett módon azonban a talaj-növény-légkör rendszerben a hőmérséklet és a növényzetet befolyásoló egyéb meteorológiai tényezők hatásai is érvényesülnek. Jelen tanulmányban elsősorban a csapadék változásainak hatásait vizsgáljuk a talajnedvesség-forgalomra.



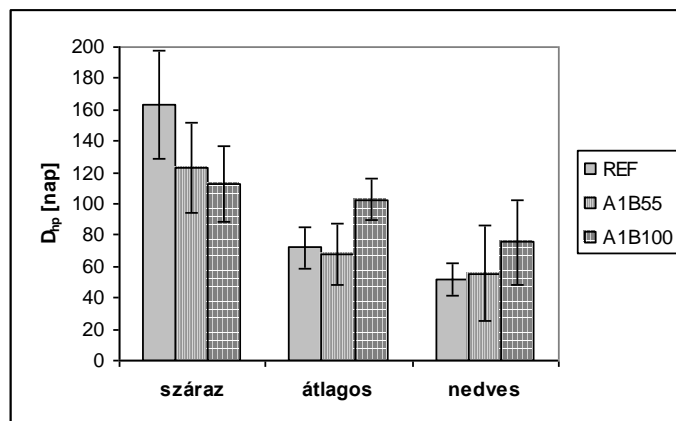
2. ábra Optimális talajnedvességű napok száma

A talajvízmérleg-elemek alakulását az időszakokat reprezentáló összesen 18 évre mutatjuk be (3. táblázat). Megállapítottuk, hogy a közeli és a távoli jövőben a párolgás és a transzspiráció növekedésével számolhatunk a száraz és csapadékos években egyaránt, ami feltételezhetően a megnövekedett csapadékmennyiségnek tudható be. A mélybeszivárgás értékeiben nem lehetett felfedezni általánosan érvényes tendenciát.

A modelleredmények alapján az optimális talajnedvességű napok száma száraz években várhatóan kismértékben növekedni fog (2. ábra), a változás azonban statisztikailag nem szignifikáns. Az eredmény vélhetően a csapadékösszeg növekedésnek (2. táblázat) köszönhető.

Átlagos és nedves években a változás kisebb, de jól látható a közeli jövőben visszaeső csapadékösszegek hatása az optimális talajnedvességű napok számán is, különösen átlagosan csapadékos években. Nedves években kismértékű csökkenést várhatunk mind a múltbeli időszak, mind a közeli jövő tekintetében.

A hervadásponthoz alatti talajnedvességű napok száma is a D_{opt} alakulásához hasonló trendekkel jellemezhető (3. ábra), azonban az átlagos csapadéku években az eltérés a referencia időszak és távoli jövő között szignifikáns.



3. ábra Hervadáspon alatti talajnedvességű napok száma

4. Vizsgálati eredmények értékelése, megvitatása, következtetések

Tanulmányunkban a RegCM regionális klímamodell hibakorrigált eredményeit használtuk fel. A modell a jelenlegi klímához képest mérsékelt változást mutatott a vizsgált területre (A1B kibocsátási forgatókönyv esetén). Ahhoz, hogy egy teljesebb, a talajvízforgalom várható változásainak teljes lehetséges spektrumát leíró képet kapjunk több, eltérő regionális klímamodell eredményeit figyelembe vevő kutatást kellene elvégezni.

A talajnedvesség alakulását a gyepek gyökérszónájában vizsgáltuk. Az optimális-, és hervadáspon alatti talajnedvességű napok számában bekövetkező változások jól követték a csapadékösszegben várható változások tendenciáját. A távoli jövőben azonban a várható csapadéknövekedés ellenére csökken az optimális és növekszik a hervadáspon alatti talajnedvességű napok száma. Ez vélhetően a csapadék egyenetlenebb eloszlásának, az átlagos napi csapadékkéntesség megnövekedésének, valamint a hőmérséklet növekedésének köszönhető.

Köszönetnyilvánítás

Munkánkat a CarpathCC projekt, valamint az OTKA K-101065, K-104816 és a TÁMOP-4.2.2.A-1/1/KONV-2012-0064 kutatási projektek támogatták. A jelen kutatás a TÁMOP 4.2.4.A-1 kiemelt projekt keretében meghirdetett ösztöndíj-támogatásnak köszönhetően valósult meg, a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával.

Irodalomjegyzék

BIRKÁS, M. & GYURICZA, CS., 2004. A talajhasználat és a klimatikus hatások kapcsolata. In: Talajhasználat – Műveléshatás – Talajnedvesség. 10–47. SZIE, Gödöllő.

- DOBOR, L., BARCZA, Z. & HAVASI, Á., 2012. Regionális klímamodell eredmények hibakorrekciója. Környezettudományi Doktori Iskolák Konferenciája, 2012. 29-36. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- ENTIN, J., ROBOCK, A., VINNIKOV, K.Y., QIU, S., ZABELI, V., LIU, S., NAMKHAI, A. & ADYASUREN, TS., 1999 Evaluation of Global Soil Wetness Project soil moisture simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77** 183–198.
- FARKAS, CS. & RAJKAI, K., 2002. Moisture regime with respect to spatial variability of soil hydrophysical properties. *Agrokémia és Talajtan* **51**. 1-2, 7–16.
- HAGYÓ, A., 2009. Vízforgalom gyep erdő területeken. Doktori értekezés, Szent István Egyetem 129 p. http://szie.hu/file/tti/archivum/Hagyo_Andrea_phd.pdf
- JUHÁSZ I., 2006. Magyarország talajainak állapota a Talajvédelmi Információs és Monitoring rendszer (TIM) adatai alapján, Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium, Budapest, pp. 117.
- KONCSOS, L., FLACHNER, ZS. & FONYÓ, GY., 2004. Dynamic modelling for water retention based floodplain management at Bodroghöz. Hungary. Proc. Of the 7th INTERCOL Wetland Conference
- KOVÁCS, G. J. & DUNKEL, Z., 1997. A klímaváltozás várható következményei Magyarország szántóföldjein a következő félszázadban. Meteorológiai Tudományos Napok Kiadványa, Nov. 20-21, 1997, Budapest, 181–193 o.
- MEEHL, G. A., ZWIERS, F., EVANS, J., KNUTSON, T., MEARN, L. & WHETTON, P., 2000. Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **81**. 427–436
- NÉMETH, T., 1996. Nitrogen balances in long- term field experiments. *Fertilizer Research* **43**. 13–19.
- THORNTON, P.E., & S.W. RUNNING, 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agric. For. Meteorol.* **93**. 211–228.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**. 892–898
- TUBA, Z., NAGY, Z. & CZÓBEL, SZ., 2004. Hazai gyep társulások funkcionális ökológiai válaszai, C-körforgalma és üvegházhatású gázainak mérlege jövőbeni várható éghajlati viszonyok, illetve eltérő használati módok mellett. *AGRO 21 Füzetek*. **37**. 123–138.
- VAN DAM, J. C., 2000. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Doktori értekezés, Wageningen University, 167 p. <http://library.wur.nl/wda>.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ, F. J., & YATES, S. R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. 85 p.
- VÁRALLYAY, GY., 1992. Globális klímaváltozások hatása a talajra. *Magyar Tudomány* **9**. 1071–1076
- WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C. & MOSS, R. H., 1996. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 878 pp.